

Odziv modernih vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži

Predrag Mršić^{1,2}, Željko Đurišić¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

² Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH
predrag.mrsic@etf.unibl.org, djurisic@etf.bg.ac.rs

Sažetak — Posljednjih godina instalirani kapacitet vjetroelektrana u svijetu se rapidno povećao. Rapidno povećanje broja vjetroelektrana dovelo je do promjena dinamičkih karakteristika sistema. Da bi se održala tranzientna stabilnost sistema, vjetroelektrane velikih snaga moraju ostati povezane na elektroenergetsku mrežu za vrijeme propada napona. U ovom radu su analizirani odzivi vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i vjetroagregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora, na propade napona u priključnoj mreži.

Ključne riječi — energetska mreža; mrežni kodeks; propad napona; vjetroagregat

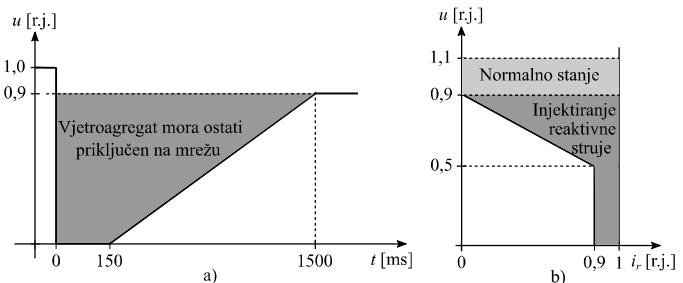
I. UVOD

Globalni ekološki problemi i sve veće potrebe za električnom energijom doveli su do vrtoglavog razvoja obnovljivih izvora energije. Najveći trend razvoja u oblasti obnovljivih izvora energije danas ima vjetroenergetiku. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana na kraju 2018. godine u svijetu je iznosila oko 600 GW. Vodeća zemlja po broju instaliranih vjetroelektrana u svijetu je Kina koja je u 2018. godine instalirala 21,2 GW vjetroelektrana na kopnu i 1,8 GW na moru, čime je ukupna instalirana snaga premašila 200 GW. Evropska unija (EU) svake godine izgradi oko 10 GW novih vjetroelektrana, tako da je na kraju 2018. godine ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u EU iznosila oko 180 GW, od čega je oko 20 GW vjetroelektrana na moru. Vodeće zemlje po broju instaliranih kapaciteta u EU su Njemačka (59,3 GW), Španija (23,5 GW) i Velika Britanija (21 GW) [1], [2].

Rapidno povećanje broja vjetroelektrana priključenih na elektroenergetski sistem dovelo je do promjene dinamičkih karakteristika sistema. Da bi se održala tranzientna stabilnost sistema od velikih vjetroelektrana priključenih na prenosnu mrežu zahtijeva se da ostanu povezane na mrežu tokom određenog perioda za vrijeme propada napona. U većini zemalja je to uređeno putem mrežnog kodeksa (engl. *grid code*) [3]. Krive koje definišu oblast u kojoj se može nalaziti napon kada vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu zavise od države do države. U određenim zemljama se zahtijeva da vjetroagregat ostane povezan na mrežu i prilikom kratkotrajnog pada napona na nulu. Tipična kriva koja definiše oblast kada vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu je prikazana na Sl. 1a. Vjetroagregat mora ostati povezan na mrežu 150 ms ako dođe do potpunog gubitka napona, a najduže treba ostati 1,5 s u slučaju propada napona na 90% nominalne vrijednosti. Takođe, tokom rada sa naponom koji je niži od 90%

nominalnog, vjetroagregat treba da u mrežu isporučuje reaktivnu snagu kako bi se popravile naponske prilike. Reaktivna snaga, odnosno reaktivna struja koja se isporučuje u mrežu zavisi od napona u toku poremećaja, Sl. 1b. Smanjenje napona na vrijednost veću od 90% nominalnog napona smatra se normalnim radnim režimom, te se za te vrijednosti napona ne zahtijeva da vjetroagregat generiše reaktivnu snagu. Nakon isključenja kvara i povratka napona na nominalno radno stanje vjetroagregat može ponovo početi da isporučuje aktivnu snagu u mrežu [3], [4].

U nastavku rada će biti analiziran rad modernih vjetroagregata pri propadima napona u priključnoj mreži. Tipovi vjetroagregata su pobrojani i ukratko opisani u drugom dijelu, dok su u trećem dijelu analizirani odzivi vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži.



Sl. 1. Krive koje definisu rad vjetroagregata pri propadu napona u mreži, kada mora a) ostati povezan na mrežu, b) isporučivati reaktivnu snagu [4].

II. TIPOVI VJETROAGREGATA

Širom svijeta danas se koriste vjetroagregati različitih tehnologija. Razlikuju se po cijeni, kompleksnosti, efikasnosti i opremi koja je ugrađena. Tipična vjetroturbina ima horizontalnu osovinu sa glavčinom na koju su montirane najčešće tri lopatice i može da prati smjer duvanja vjetra. Kao generator se često koristi indukciona mašina koja može imati fiksnu ili promjenljivu brzinu obrtanja. Pored indukcionog generatora može se sresti i sinhroni generator sa i bez stalnih magneta na rotoru i različitog broja pari polova, odnosno brzine obrtanja. Izbor generatora obično utiče na izbor pretvarača i na način toka energije. Tu se sreću sistemi bez pretvarača, sa pretvaračima preko kojih se dio energije prenosi u mrežu i pretvarači preko kojih se cijelokupna električna energija koju proizvodi vjetrogenerator prenosi u mrežu.

Prema kriterijumu kontrole brzine obrtanja vjetroturbine razlikujemo četiri tipa vjetroagregata:

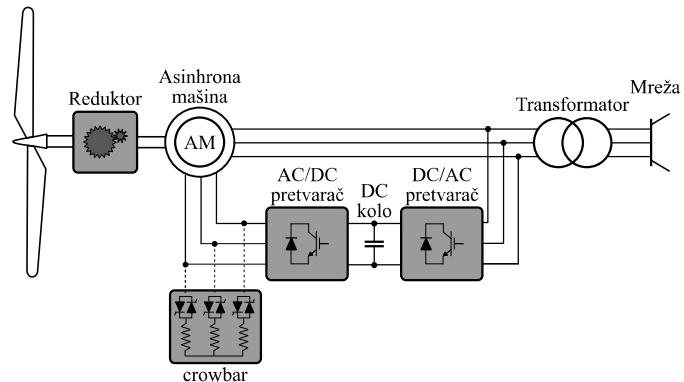
- Tip A: Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa kaveznim rotorom (engl. *Fixed-Speed Wind Turbines*),
- Tip B: Vjetroagregati sa asinhronim mašinom sa namotanim rotorom i promjenljivim otpornikom u rotorskem kolu (engl. *Variable-Slip Wind Turbines*),
- Tip C: Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa (engl. *Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines*) i
- Tip D: Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora koji je dimenzionisan na punu snagu generatora (engl. *Full Converter Wind Turbines*) [5]–[7].

U prvim vjetroagregatima su korišćene asinhronne mašine koje rade sa konstantnom brzinom obrtanja sa jednom ili dvije brzine (Tip A). Brzina se jako malo mijenja oko sinhronе zbog male promjene klizanja (do 3%). Da bi se omogućio rad vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja vjetroturbine razvijeni su koncepti sa asinhronim mašinama sa promjenljivim otpornikom u kolu rotora (Tip B). Oko 2000. godine za vjetroturbine velikih snaga su sve češće korišćeni vjetroagregati sa dva električna pristupa i pretvaračem u kolu rotora (Tip C). U isto vrijeme razvijeni su i vjetroagregati sa pretvaračem u kolu statora. U tim izvedbama se kao generator može koristiti asinhrona ili sinhrona mašina sa promjenljivom brzinom obrtanja, budući da se sva energija u mrežu isporučuje preko pretvarača (Tip D) [8].

U ovom radu će se analizirati rad vjetroagregata tipa C i D pri propadima napona u priključnoj mreži, pa će u nastavku teksta biti detaljnije opisan način rada ovih vjetroagregata.

A. Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u rotorskem kolu

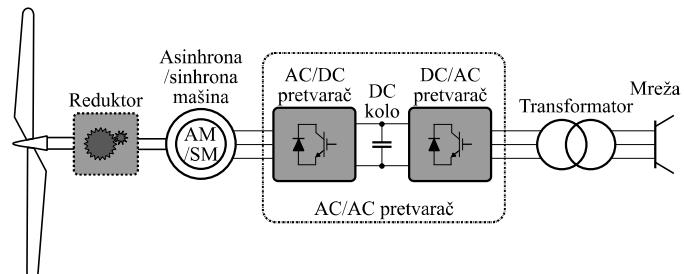
Koncept ovog vjetroagregata je prikazan na Sl. 2. On spada u kategoriju vjetroagregata sa promjenljivom brzinom obrtanja. Statorski namot asinhronne mašine se direktno priključuje na mrežu, a rotorski preko AC/AC pretvarača. AC/AC pretvarač se realizuje od AC/DC i DC/AC pretvarača sa zajedničkim DC kolom. AC/DC pretvarač na strani rotora asinhronne mašine upravlja momentom vjetrogeneratora, odnosno promjenom brzine obrtanja u cilju maksimalne apsorpcije kinetičke energije vjetra i vrši regulaciju reaktivne snage. DC/AC pretvarač povezuje DC kolo sa elektroenergetskom mrežom. Negova uloga je da održava napon DC kola na željenoj vrijednosti promjenom smjera aktivne snage u zavisnosti od radnog režima vjetroagregata. Glavni nedostatak vjetroagregata sa asinhronim mašinama sa dva električna pristupa je rad vjetroagregata pri kvarovima u mreži. Kvarovi u mreži uzrokuju pad napona na priključcima vjetroagregata, koji dovodi do porasta struje u statorskom kolu. Zbog magnetske sprege statora i rotora povišena struja teče i kroz namotaje rotora, te kroz pretvarač. Ta struja, ako se ne ograniči, može oštetiti pretvarač. Ograničenje struje rotora je moguće izvesti ograničavajući maksimalnu struju pretvarača, ali to dovodi do visokih napona DC kola koje opet može dovesti do uništenja pretvarača. Drugi način da se ograniči struja kroz pretvarač i spriječi njegovo uništenje je da se rotorski namotaj kratko spoji preko otpornika (engl. *crowbar*).



Sl. 2. Elektromehanička konverzija vjetra u vjetroagregatu sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u kolu rotora.

B. Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora

Ovaj koncept vjetroagregata omogućava pun opseg promjene brzine obrtanja (engl. *variable speed system*), od 0 do 100% nominalne brzine vjetrogeneratora. Principijelna šema koncepta je prikazana na Sl. 3. Sistem se zasniva na upotrebi AC/AC pretvarača koji je dimenzioniran na punu snagu vjetrogeneratora. AC/AC pretvarač povezuje vjetrogenerator sa elektroenergetskom mrežom. Na ovaj način generator je potpuno frekvencijski raspregnut od mreže. Stoga, kao generator se može koristiti asinhrona ili sinhrona mašina. Obično se koristi asinhrona mašina sa kaveznim rotorom, sinhrona mašina sa namotanim rotorom, sa stalnim magnetima i sinhrona mašina sa velikim brojem pari polova na statoru, koja opet može imati namotan rotor ili rotor sa stalnim magnetima. Pored frekvencijskog rasprezanja vjetroagregata i mreže, postojanje AC/AC pretvarača omogućava raspregnuto upravljanje aktivnom i reaktivnom snagom. Danas se najčešće koristi *back to back* pretvarač koji se sastoji od AC/DC i DC/AC pretvarača koji su povezani na isto DC kolo. DC kolo omogućava razdvajanje upravljačkih krugova ova dva pretvarača. Pretvaračem na strani statora asinhronе/sinhronе машине se upravlja reaktivnom snagom i brzinom obrtanja vratila vjetroagregata kako bi se ostvarila maksimalna efikasnost elektromehaničke konverzije energije vjetra. Dok se pretvaračem na strani mreže upravlja aktivnim i reaktivnim snagama koje se injektiraju u mrežu [6].



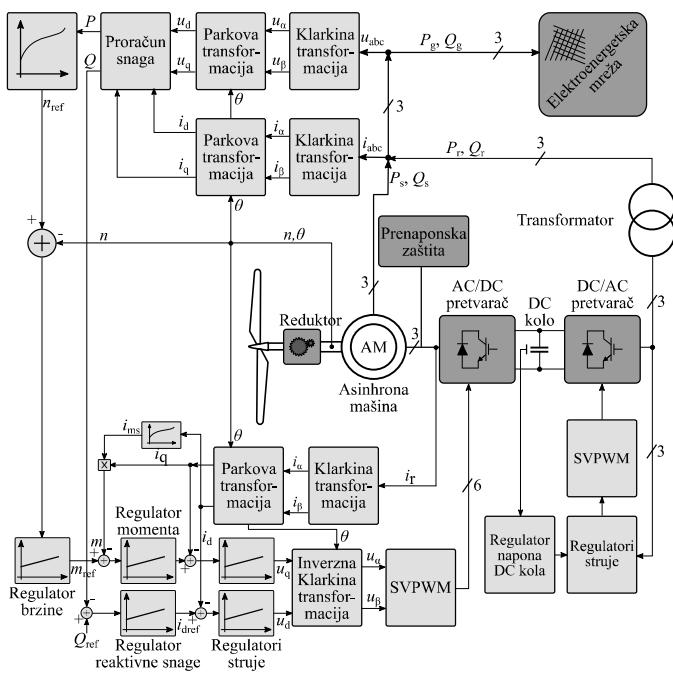
Sl. 3. Vjetroagregat sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora.

III. ODZIVI VJETROAGREGATA PRI PROPADIMA NAPONA

U ovom dijelu će biti ukratko opisan način rada i analiziran odziv vjetroagregata na propade napona u priključnoj mreži.

A. Vjetroagregati sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i pretvaračem u rotorskom kolu

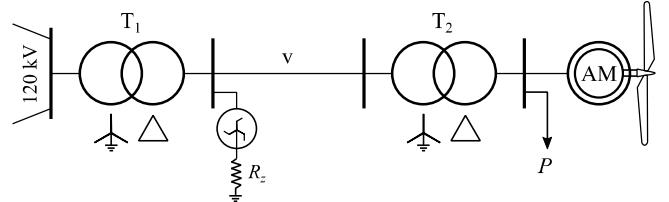
Asinhrona mašina sa dva električna pristupa se može magnetisati sa strane statora i/ili sa strane rotora. Injektiranjem struje rotora odgovarajućeg intenziteta i faze može se postići željena reaktivna struja statora, čime se može mašina dovesti u željeni režim rada, normalni, induktivni ili kapacitivni. Tipična šema upravljanja asinhronom mašinom sa dva električna pristupa je prikazana na Sl. 4. Proračun aktivne i reaktivne snage prikazan je u gornjem lijevom dijelu šeme. Snage se proračunavaju na osnovu napona i struje u dq koordinatnom sistemu. Dakle, prije proračuna snaga izvršena je transformacija struja i napona u dq koordinatni sistem. dq koordinatni sistem se orijentiše tako da se omogući nezavisno upravljanje strujama po d i q osi. Na osnovu aktivne snage i karakteristike turbine određuje se referentna brzina obrtanja. Razlika zadate i trenutne brzine se vodi na regulator brzine na čijem izlazu se dobija referentna vrijednost momenta. Razlika momenta, zadatog i izračunatog se vodi na regulator momenta, na čijem izlazu se dobija referentna struja po q osi. Za razliku od aktivne snage, koju definiše brzina vjetra, reaktivna snaga se može proizvoljno zadati. Razlika referentne i izmerene reaktivne snage se vodi na regulator snage. Na izlazu regulatora se dobija referentna struja po d osi. Referentni naponi po d i q osi, na osnovu kojih se računaju faktori popune upravljačkih signala za AC/DC pretvarač, dobijaju se na izlazu regulatora struja. DC/AC pretvaračem u kolu rotora se upravlja tako da se napon DC kola održava na konstantnoj vrijednosti, a reaktivna snaga na nuli. Reaktivnom snagom vjetroagregata se upravlja pretvaračem na strani rotora, dok se pretvaračem na strani mreže omogućava samo razmjena aktivne snage tako da se napon DC kola održava na konstantnoj vrijednosti [9].



Sl. 4. Šema upravljanja vjetroagregatom sa dva električna pristupa [9].

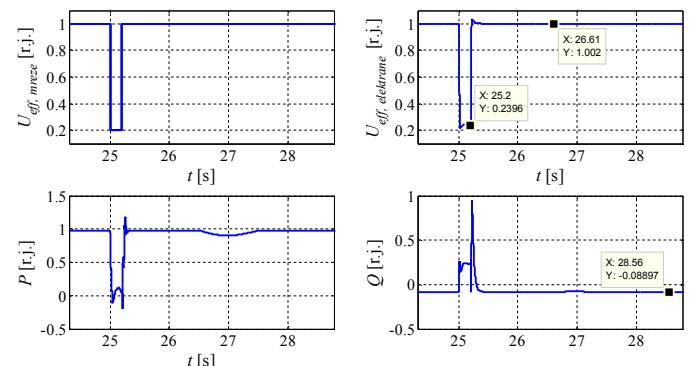
Za snimanje odziva vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa koristiće se model vjetroelektrane snage 9 MW koji je ugrađen u programske paket MATLAB®.

Vjetroelektrana se sastoji od šest vjetroagregata pojedinačne snage 1,5 MW. Nominalni napon generatora je 575 V. Preko dva transformatora T_1 (120/25 kV/kV) i T_2 (25/0,575 kV/kV) i voda v (dužine 30 km) vjetroelektrana je povezana na elektroenergetsku mrežu. Tokom simulacije brzina vjetra je konstantna i iznosi 14 m/s. Pri normalnom naponu mreže razmjena reaktivne snage sa mrežom je jednaka nuli [10]. Skica vjetroelektrane prikazana je na Sl. 5.



Sl. 5. Skica vjetroelektrane priklučene na prenosnu elektroenergetska mrežu.

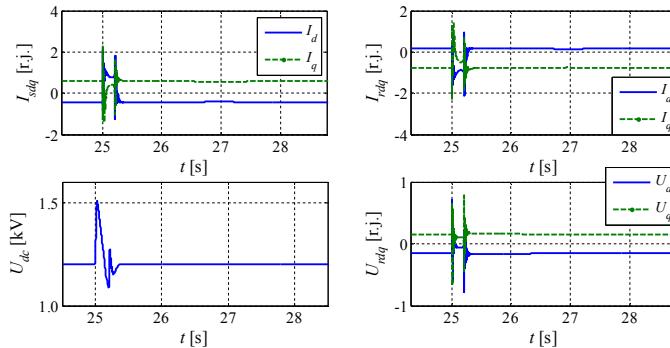
Odziv brzine, aktivne i reaktivne snage pri trofaznom propadu napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s prikazan je na Sl. 6. Tokom normalnog radnog režima ($t < 25$ s) vjetroagregat injektira u mrežu nominalnu aktivnu snagu, dok je reaktivna snaga nešto manja od nule zbog napona na priključcima vjetroagregata koji je nešto veći od 1 r.j. Nastankom kvara u priključnoj mreži i propadom napona na 0,2 r.j. vjetroagregat prestaje da injektira aktivnu snagu u mrežu, a aktivira se proizvodnja reaktivne snage kako bi se popravile naponske prilike u mreži. Efekat injektiranja reaktivne snage od strane vjetroagregata se mogu vidjeti na dijagramima gdje je prikazana efektivna vrijednost napona na priključcima vjetroagregata. Naime, napon u 120 kV mreži (na Sl. 6 označen sa $U_{eff, mreže}$) je pao na 0,2 r.j. dok je napon na priključcima vjetroelektrane (na Sl. 6 označen sa $U_{eff, elektrane}$) pao na vrijednost 0,239 r.j. Blagi propad injektiranja aktivne snage u mrežu u okolini $t = 27$ s će biti nešto kasnije komentaran.



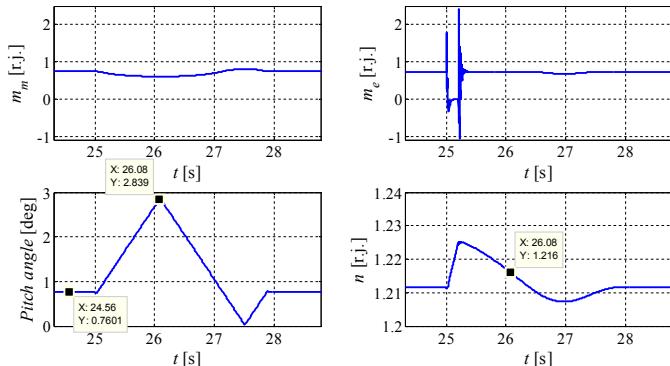
Sl. 6. Odziv aktivne i reaktivne snage vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanja 0,2 s.

Promjenom snaga injektiranja u mrežu mijenjaju se struje u dq koordinatnom sistemu. Prema upravljačkoj šemi datoj na Sl. 4, strujom po d osi se upravlja reaktivnom snagom, a strujom po q osi momentom. Promjena struja statora i rotora, napona DC kola i napona na rotoru prikazana je na Sl. 7. Prije nastanka kvara u priključnoj mreži, struja statora (I_{sdq}) po d osi je negativna iz razloga potrošnje reaktivne snage, a struja po q osi je pozitivna jer se injektira aktivna snaga u mrežu. Nastankom kvara, struja po d osi mijenja smjer jer i vjetro-

agregat prelazi iz potrošnje u proizvodnju reaktivne snage, a struja po q osi opada jer aktivna snaga teži nuli. Budući da se regulacija snaga realizuje pretvaračem u rotorskom kolu struje (I_{rdq}) i naponi (U_{rdq}) rotorskog kola mijenjaju svoje vrijednosti u odnosu na stanje prije poremećaja. Struja po d osi mijenja smjer kako bi se promijenio tok reaktivne snage, a struja po q osi teži nuli. Nastankom kvara, uslijed velikih skokova struja rotora i nepostojanja *crowbar*-a napon DC kola se skokovito mijenja sa 1,2 kV na 1,5 kV. Takođe, propadom napona na priključcima vjetroagregata mijenja se i mehanički momenat mašine. Promjena momenata vjetroagregata i turbine, ugla lopatica vjetroturbine i brzine obrtanja je prikazana na Sl. 8.



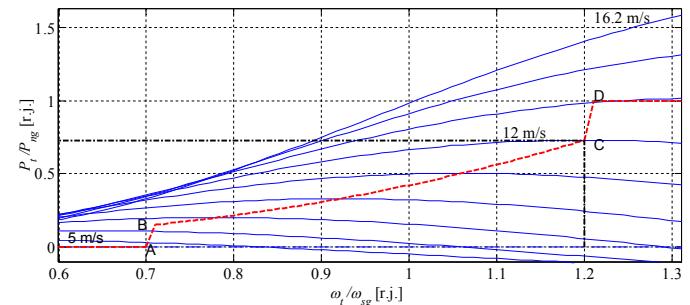
Sl. 7. Odziv struja i napona po d i q osi i napona DC kola vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti.



Sl. 8. Odziv brzine i momenta turbine, te promjena ugla lopatica vjetroturbine vjetroagregata tipa C na propad napona u priključnoj mreži na 20% nominalne vrijednosti i trajanju 0,2 s.

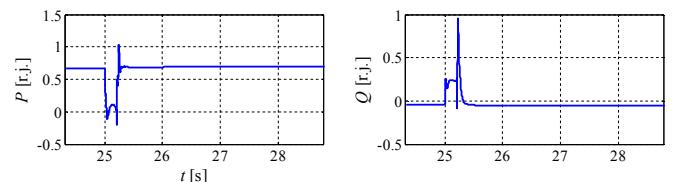
Brzina vjetra tokom simulacije je 14 m/s. Ta brzina vjetra je nešto veća od brzine pri kojoj vjetroagregat dostiže nominalnu snagu, te je ugao lopatica 0,76°. Pri propadu napona momenat vjetroagregata (m_e) pada na nulu, dok i dalje postoji momenat turbine (m_m). Usljed razlike momenata vratilo mašine počinje da ubrzava, ali i regulator ugla lopatica reaguje povećanjem ugla lopatica kako bi se smanjio momenat turbine. Međutim, zbog razlike u brzini odziva električnih i mehaničkih prelaznih procesa vratilo vjetroagregata ubrza do 1,225 r.j. To je prvenstveno ograničeno trajanjem propada napona i inercijom sistema. Povratkom napona u priključnoj mreži na nominalnu vrijednost, mehanički momenat vjetroagregata postaje veći od momenta turbine, te vratilo počinje da usporava. Pri tome, brzina vratila je i dalje veća od brzine pri kojoj turbina dostiže nominalnu snagu, Sl. 9, pa se nastavlja porast ugla lopatica vjetroturbine. Tek kada brzina vratila mašine, a ujedno i brzina obrtanja turbine padne ispod 1,21 r.j.,

sto odgovara nominalnoj snazi turbine, ugao lopatica vjetroturbine prestaje da raste i počinje da opada. U trenutku dostizanja maksimalnog ugla lopatica vjetroturbine, momenat vjetroturbine dostiže minimalnu vrijednost, a sa smanjenjem ugla lopatica počinje da raste. Zbog različitih brzina odziva promjene ugla lopatica vjetroturbine i promjene brzine vratila, brzina vratila se smanjuje ispod brzine za koju turbina dostiže nominalnu snagu. Kada se ugao lopatica vrati na vrijednost prije poremećaja, brzina turbine je manja od brzine za koju se ima nominalna snaga, pa ugao nastavlja i dalje da pada. Tada momenat turbine postaje veći od momenta vjetroagregata i vratilo počinje da ubrzava, da bi poslije određenog vremena dostiglo brzinu pri nominalnoj snazi. Zbog propada brzine obrtanja ispod nominalne dolazi do smanjenja momenta i snage ispod nominalne vrijednosti, te fluktuacija u struji.



Sl. 9. Karakteristike snage vjetroturbine za različite brzine vjetra u funkciji brzine obrtanja vjetroturbine (plava) i referentna karakteristika (crvena).

Na Sl. 9 isprekidanom linijom je prikazana kriva snage u funkciji brzine obrtanja. Dio od B do C je dobijen spajanjem tačaka pri kojima se ima maksimalna efikasnost elektromehaničke konverzije. Ako bi brzina vjetra bila manja od 12 m/s regulator ugla lopatica vjetroturbine bi bio isključen, pa bi pri propadu napona momenat turbine ostao nepromijenjen. Kao posljedica ovoga ne dolazi do fluktuacije struja i snage nekoliko sekundi nakon završetka propada napona, Sl. 10.

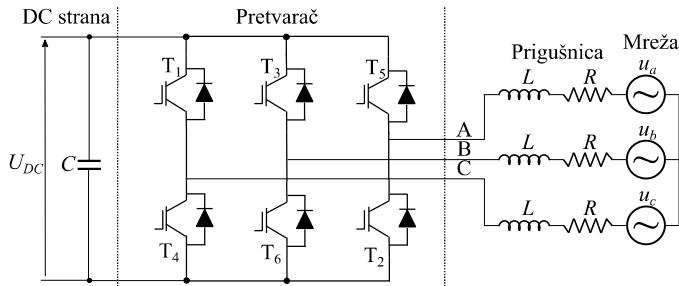


Sl. 10. Odziv aktivne i reaktivne snage vjetroagregata tipa C na propad napona na 20% nominalne vrijednosti i trajanju 0,2 s pri brzini vjetra od 12 m/s.

B. Vjetroagregati sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora

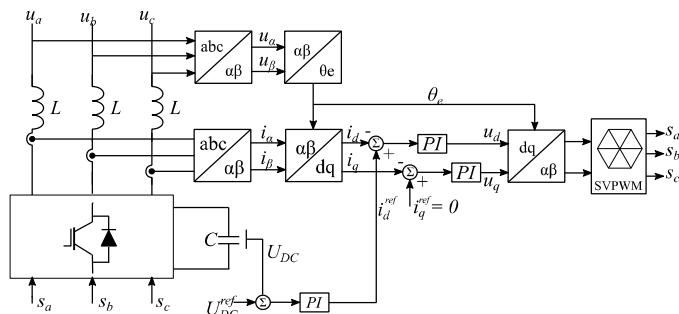
Ako pretpostavimo da je brzina vjetroturbine konstantna tokom poremećaja u priključnoj mreži, bez obzira na to koji vjetrogenerator se koristi, može se smatrati da se kondenzator u DC kolu puni određenom strujom, koja treba da odgovara konstantnoj snazi. Stoga, za analizu odziva vjetroagregata pri propadu napona u priključnoj mreži može se posmatrati samo DC/AC pretvarač (pretvarač na strani mreže). U određenim radovima, za analize odziva vjetroagregata, pri poremećajima u mreži, smatra se da je napon DC kola konstantan. U tom slučaju se smatra sa postoji dodatni otpornik u DC kolu pomoću koga se napon održava na konstantnoj vrijednosti [11]–[13].

Osnovna šema energetskog dijela DC/AC pretvarača prikazana je na Sl. 11. Induktivnost (L) i otpornost (R) predstavljaju parametre prigušnice koja povezuje elektroenergetsku mrežu sa ulazom pretvarača. Struja na ulazu pretvarača kontrolisana je padom napona na prigušnici koja povezuje dva naponska izvora (elektroenergetsku mrežu i pretvarač). To znači da je pad napona na prigušnici jednak razlici napona na pretvaraču i napona mreže. Ako posmatramo DC/AC pretvarač kao jednu cjelinu čiji je zadatak da održava napon na kondenzatoru na konstantnoj vrijednosti, model se može izvesti na dva načina, naravno to ne utiče na rad pretvarača nego samo na referentni smjer snage, da je referentni smjer snage i struje ka pretvaraču ili od njega. U ovom radu će se izvesti model tako da je referentni smjer struje ka pretvaraču.



Sl. 11. Energetska šema DC/AC pretvarača.

Pri modelovanju pretvarača orijentacija sinhrono rotirajućeg koordinatnog sistema će se vršiti prema vektoru napona mreže, pa je skica upravljačkih signala prikazana samo za tu tehniku upravljanja, Sl. 12. Na ulazu pretvarača mjeri se fazni naponi iz kojih se računa položaj polifazora napona koji se koristi za orijentaciju sinhrono rotirajućeg koordinatnog sistema. Zatim, mjeri se struja kroz prigušnicu, preslikava u sinhrono rotirajući koordinatni sistem i poredi se zadatom strujom. Referentna vrijednost struje po d osi se dobija na izlazu PI regulatora za napon, a po q osi se proizvoljno zadaje (obično je jednaka nuli da bi pretvarač radio sa jediničnim faktorom snage). Na izlazu strujnih regulatora dobija se napon koji se transformiše u stacionarni $\alpha\beta$ koordinatni sistem i vodi na blok za generisanje upravljačkih signala za tranzistore.



Sl. 12. Šema upravljačkih signala DC/AC pretvarača.

Model pretvarača u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu je dat sljedećim jednačinama:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C \frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{3}{2} [S_d \quad S_q] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdje su S_d i S_q funkcije koje zavise od stanja prekidača. Snaga pretvarača u dq koordinatnom sistemu se je:

$$\begin{aligned} P_{dq} &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{3}{2} (u_d + ju_q)(i_d - ji_q) \right\} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_{dq} &= \operatorname{Im} \left\{ \frac{3}{2} (u_d + ju_q)(i_d - ji_q) \right\} = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{aligned} . \quad (3)$$

Uvrštavanjem $u_q = 0$ zbog toga što je rotirajući koordinatni sistem postavljen tako da je napon koncentrisan u d osu i ako struju i_q održavamo na nuli, što možemo ostvariti upravljanjem, dobijamo da nam pretvarač radi sa jediničnim faktorom snage.

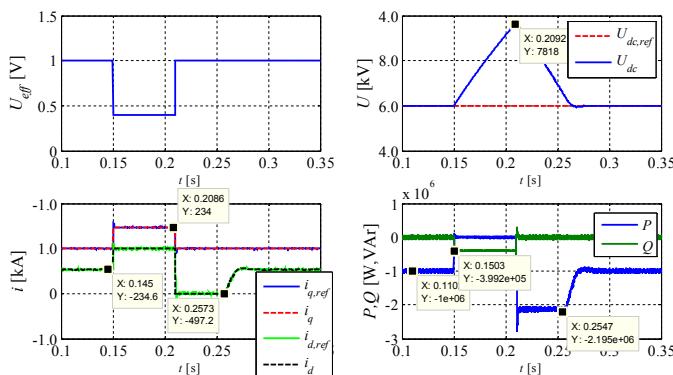
Posmatrajući šemu upravljačkih signala pretvarača mogu se uočiti dvije upravljačke petlje. Prva, unutrašnja petlja je petlja koja reguliše struje po d i q osi, a druga nadređena petlja je petlja za regulaciju napona na kondenzatoru. Dakle, da bi se omogućio rad pretvarača potrebno je projektovati dva tipa PI regulatora. Regulatori su projektovani tako da se obezbijedi aperiodečan odziv. Odziv pretvarača na propad napona odgovara odzivu vjetroagregata ovog tipa pri propadu napona. Pri ovoj analizi smatra se da se brzina vjetra ne mijenja tokom poremećaja u elektroenergetskoj mreži, te da je struja koja se injektira u DC kolo sa strane AC/DC pretvarača takva da je snaga konstantna. Pri propadu napona od vjetroagregata se traži da se ponaša u skladu sa određenim uslovima: da ostanu konektovani na mreži određeni period nakon kvara u zavisnosti od napona tokom kvara i da injektiraju reaktivnu snagu u mrežu. Za karakteristiku injektiranja reaktivne snage u mrežu tokom propada napona koristiće se kriva data u [11]. Reaktivna struja se linearno povećava od nule pri propadu napona na 90% nominalne vrijednosti sve do propada napona na 50% nominalne vrijednosti kada dostiže nominalnu struju pretvarača. Za propade napona na vrijednosti manje od 50% nominalnog napona u mrežu se isporučuje reaktivna struja koja je jednaka nominalnoj struci pretvarača.

Odziv vjetroagregata snage 1 MW, pri propadu napona na 40% nominalne vrijednosti prikazan je na Sl. 13. U normalnom radnom stanju vjetroagregat injektira u mrežu samo aktivnu snagu, dok je reaktivna jednaka nuli. Pri propadu napona na 40% nominalne vrijednosti, vjetroagregat u mrežu injektira samo reaktivnu struju, prema tome aktivna snaga pada na nulu. Injektirajući reaktivnu struju koja po amplitudi odgovara nominalnoj struci, u mrežu se injektira reaktivna snaga dosta manja od nominalne, razlog za to leži u činjenici da je napon mreže i ogovarajući napon po d osi niži od nominalnog. Pa prema (3), ako je struja po q osi nominalna i ako je napon po d snižen na 40% nominalne vrijednosti u mrežu se injektira:

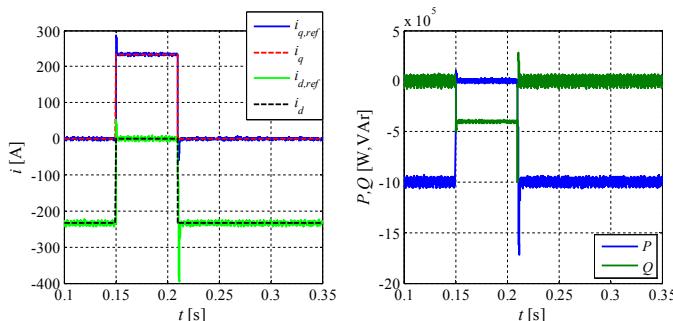
$$Q_{dq} = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) = -\frac{3}{2} 0,4 \cdot u_d i_q . \quad (5)$$

Dakle, u mrežu se injektira 40% snage koja bi se mogla injektirati, ako bi aktivna snaga bila na nuli, tokom nominalnog napona na priključcima. Kontrola snaga je ostvarena

kontrolom struja u dq koordinatnom sistemu, pa su na slici prikazane referentne vrijednosti i odzvi struja. Nastankom kvara, aktivna snaga pada na nulu, i blokira se regulator napona na kondenzatoru. To dovodi do pojave da napon linearno raste. O ovome treba voditi računa, posebno za propade napona koji traju duže vremena i kod kojih se u mrežu ne injektira aktivna snaga. Usljed povišenog napona na kondenzatoru, povratkom nominalnog napona na priključke vjetroagregata, regulator napona ulazi u zasićenje, te referentna struja po d osi raste do maksimalne vrijednosti (ograničena je ograničenjem struje regulatora) što dovodi do toga da pretvarač u mrežu injektira aktivnu snagu veću od nominalne. Sniženjem napona na kondenzatoru na nominalnu vrijednost, aktivna snaga se vraća na nominalnu vrijednost. U drugom slučaju ako se pretpostavi da je napon na kondenzatoru konstantan, kakav je slučaj kod vjetroagregata sa sinhronom mašinom, nema porasta aktivne snage preko nominalne povratkom nominalnog napona na priključke vjetroagregata. Odziv vjetroagregata u ovom slučaju takođe, za propad napona na priključcima na 40% nominalne vrijednosti prikazan je na Sl. 14. U suštini odziv je jako sličan prethodnom slučaju, smo u odnosu na prethodni slučaj nema porasta struje po d osi, odnosno porasta aktivne snage nakon povratak nominalnog napona napajanja.



Sl. 13. Odziv vjetroagregata tipa D pri propadu napona u priključnoj mreži na 40% nominalne vrijednosti i trajanja 0,06 s.



Sl. 14. Odziv vjetroagregata tipa D pri propadu napona u priključnoj mreži na 40% nominalne vrijednosti i trajanja 0,06 s pod pretpostavkom da je napon na kondenzatoru konstantan.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran odziv vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa i vjetroagregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora koji je dimenzionisan na punu snagu generatora na

propade napona u priključnoj mreži. Za analizu odziva vjetroagregata sa asinhronom mašinom sa dva električna pristupa korišćen je model kompletног sistema, dok je za analizu odziva vjetroagregata sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora napravljen model samo pretvarača na strani mreže. Analiziran je odziv vjetroagregata pri propadu napona na 20%, odnosno 40% nominalne vrijednosti za vjetroagregat sa asinhronom ili sinhronom mašinom i pretvaračem u kolu statora. Pri posmatranim propadima napona aktivna snaga oba vjetroagregata pada na nulu, a u mrežu se injektira reaktivna struja kako bi se popravile naponske prilike. Povratkom napona na stanje prije poremećaja, snage vjetroagregata se vraćaju na prvobitne vrijednosti.

LITERATURA

- [1] Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2018, April 2019.
- [2] Wind Europe Business Intelligence, Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics, 2019.
- [3] M. Tsili, and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," IET Renew. Power Gener., vol. 3, no. 3, pp. 308-332, March 2009.
- [4] H. Yi-Liang, W. Yuan-Kang, C. Chiu-Kuo, W. Chih-Hua, C. Wei-Tai, and C. Liang-II, "A Review of the Low-Voltage Ride-Through Capability of Wind Power Generators," Energy Procedia, vol. 141 pp. 378-382, December 2017.
- [5] S. Chakrabort, M.G. Simões, W.E. Kramer, Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems - A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer-Verlag London 2013.
- [6] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [7] Z. Chen, "Generators of Modern Wind Turbines," Proc. of the International Conference and Exhibition of Renewable Energy, 2008.
- [8] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2011.
- [9] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion System, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2014.
- [10] MATLAB Documentation, "Wind Farm - DFIG Detailed Model," dostupno na: www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html.
- [11] S. Alepu, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, A. Martinez-Velasco, C. Silva, J. Ponti, J. Rodriguez, "Control strategies based on symmetrical components for grid-connected converters under voltage dips," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173, Jun 2009.
- [12] J. F. Conroy, R. Watson, "Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator," IET Renew. Power Gener., vol. 1, no. 3, pp. 182-189, September 2007.
- [13] M. Fatu, C. Lascau, G. D. Andreescu, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, I. Boldea, "Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSM for wind turbines," Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 1, pp. 171-178, September 2007.

ABSTRACT

In recent years, global wind energy capacity has increased rapidly. The increasing wind power penetration gradually changes the dynamic characteristics of power systems. To maintain the transient stability of a power system, large scale wind power plants must stay connected to the grid during voltage sags. In this paper, dynamic responses of doubly-fed induction generator wind turbines and full converter wind turbines to voltage sags are analyzed.

DYNAMIC RESPONSE OF MODERN WIND TURBINE GENERATORS TO VOLTAGE SAGS

Predrag Mršić, Željko Đurišić